

Исследование влияния флуктуационных и ударных колебаний на чувствительность сверхрегенеративных приемопередающих устройств

С. И. Кудинов✉, В. Э. Иванов

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32

✉ s.kudinov@urfu.ru

Аннотация

Рассматриваются вопросы ударного возбуждения колебательной системы транзисторного сверхрегенеративного приемопередающего устройства в момент запуска импульсами тока для разных законов затухания и их влияние на чувствительность и усиление в приемном режиме работы, определение условий достижения высокой чувствительности устройства к слабым внешним сигналам на основе анализа флуктуационных колебаний в приемном режиме работы, оценка полосы пропускания входного колебательного контура сверхрегенеративного приемопередатчика при нулевом значении затухания этого контура, а также оценка суммарного воздействия ударных и флуктуационных колебаний на параметры сверхрегенеративного приемопередатчика.

Ключевые слова

сверхрегенератор, ударные колебания, затухание контура, флуктуационные колебания, полоса пропускания колебательного контура

Для цитирования

Кудинов С. И., Иванов В. Э. Исследование влияния флуктуационных и ударных колебаний на чувствительность сверхрегенеративных приемопередающих устройств. *Уральский радиотехнический журнал*. 2019;3(2):170–194. DOI: 10.15826/urej.2019.3.2.004

Research of the influence of fluctuation and shock oscillations on the sensitivity of superregenerative transceivers

S. I. Kudinov✉, V. E. Ivanov

Ural Federal University named after first President of Russia B. N. Yeltsin, 32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia

✉ s.kudinov@urfu.ru

Abstract

We study the issues of shock excitation of the oscillatory system of a transistor superregenerative transceiver at the moment of starting with current pulses for different damping laws and their influence on the

sensitivity and gain in the receiving mode of operation, determining the conditions for achieving high sensitivity of the device to weak external signals based on the analysis of fluctuation fluctuations in the receiving mode of operation. We evaluate the bandwidth of the input oscillatory circuit of the superregenerative transceiver at zero damping of this circuit. We estimate the total impact shock and vibrations on the fluctuation parameters superregenerative transceiver.

Keywords

superregenerator, shock oscillations, contour attenuation, fluctuation oscillations, oscillation contour bandwidth.

For citation

Kudinov S. I., Ivanov V. E. Research of the influence of fluctuation and shock oscillations on the sensitivity of superregenerative transceivers. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(2):170–194. DOI: 10.15826/urej.2019.3.2.004

Введение

Изменение климата вынуждает ученых и специалистов создавать новые более усовершенствованные методы контроля окружающей среды, в том числе для исследования параметров атмосферы. Развитие систем радиозондирования (СР) атмосферы в глобальном масштабе в настоящее время осуществляется под управление Всемирной метеорологической организации (ВМО). Это способствует своевременному созданию новых технических средств для СР, повышению их характеристик и снижению расходов на эксплуатацию.

В основу построения СР были положены результаты фундаментальных исследований отечественных и зарубежных ученых: А. П. Молчанова, Г. С. Горелика, Л. С. Гуткина, М. К. Белкина, И. Р. Уайтхеда, Б. Г. Рождественского, Г. И. Кравченко и др. [1–43].

Отличительной особенностью отечественных СР является эффективное применение в составе аэрологических радиозондов (АРЗ) сверхрегенеративных приемопередатчиков (СПП) [44–53]. Это позволяет осуществить измерение пространственных координат и передачу телеметрической информации АРЗ на одной несущей частоте с высокой надежностью и минимальными затратами.

В статье проводится подробный анализ физических процессов, происходящих в транзисторном СВЧ-автогенераторе (СВЧ АГ) течение приемного интервала работы СПП, определяющих его важнейшие параметры – высокую чувствительность к запросному сигналу РЛС и избирательность. Эти вопросы частично рассматривались в ряде работ авторов, но достаточно полного, последовательного изложения всех особенностей процесса усиления сделано не было.

Необходимо пояснить эффект сверхрегенеративного усиления (СУ) внешнего сигнала. На рис. 1 изображены основные параметры СПП в течение одного периода повторения радиоимпульсов (частота суперизации F_{super}): T_{super} : U_p – огибающая радиоимпульса СПП, со стационарной амплитудой U_{st} ; τ_{super} – длительность импульса включения (импульса суперизации) СПП; τ_{demp} – интервал демпфирования; τ_d – длительность задержки переднего фронта радиоимпульсов СПП; τ_p – длительность радиоимпульсов СПП; $\Delta\tau_d$ – приращение длительности радиоимпульсов СПП за счет СУ; $\delta_{(t)}$ – закон изменения декремента затухания контура СВЧ АГ; δ_0 – декремента затухания контура выключенного СПП; δ_s – декремента затухания контура в момент запуска СПП; U_b – напряжение запуска СВЧ АГ.

При включении автогенератора в момент поступления отпиряющего напряжения $U_{\text{super}} = U_b$, отрицательный пусковой декремент затухания δ_s обеспечивает его самовозбуждение от уровня флуктуации и развитие автоколебаний до установления стационарной амплитуды U_{st} . Нарастающий характер декремента затухания $\delta_{(t)}$ связан с жестким характером переходного процесса установления автоколебаний в контуре определяемого регенеративной характеристикой СВЧ АГ [9; 11]. При поступлении внешнего запросного радиоимпульса РЛС в момент запуска время установления колебаний сокращается на величину $\Delta\tau_d$, а энергия радиоимпульса пропорционально увеличивается. Это приращение энергии используется для обнаружения ответного сигнала СПП и определения наклонной дальности до АРЗ [47–50].

Для повышения эффекта усиления внешнего сигнала необходимо обеспечивать минимальный уровень собственных шумов СВЧ АГ в момент запуска. С другой стороны, при запуске автогенератора импульсы постоянного тока создают ударные колебания (УК), которые резко снижают чувствительность и усиление

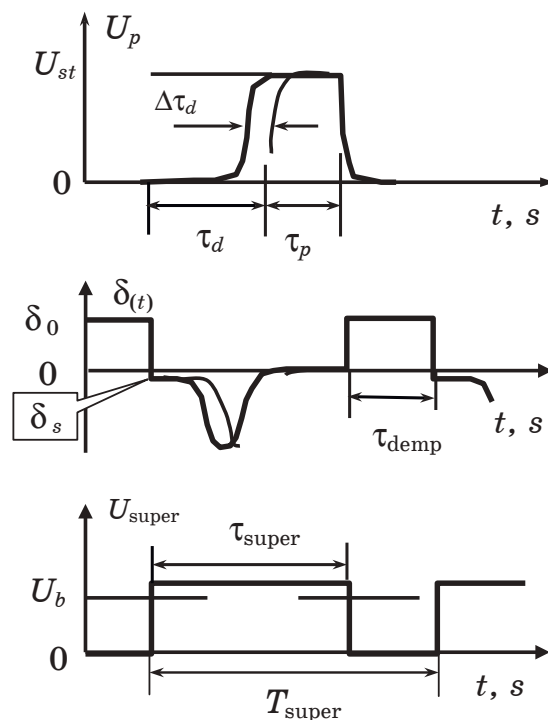


Рис. 1. Сверхрегенеративный эффект усиления

Fig. 1. Superregenerative amplification effect

ние СПП. Влияние УК на условия запуска и чувствительность сверхрегенеративных усилителей (СУ) и приемопередатчиков (СПП) исследовалось в работах авторов [3; 4; 6; 7]. Однако результаты этих исследований не были доведены до расчетных соотношений и давали только возможность качественной оценки этого эффекта. Тем не менее влияние УК практически проявляется всегда, в том числе при запуске мощных импульсных СВЧ-автогенераторов и требует соответствующего учета. Механизм их действия связан с возбуждением колебательной системы автогенератора высшими гармониками видеоимпульсов тока активного элемента в момент запуска.

В работе проводится исследование механизма формирования флуктуационных и ударных колебаний и их влияние на параметры СПП.

Исследование ударных колебаний в контуре СПП

В работе исследуется эффект ударного возбуждения колебательной системы транзисторного СПП в момент запуска импульсами тока для разных законов затухания путем численного решения дифференциального уравнения с помощью пакета МАТЛАБ. Некоторые аспекты исследования вопросов теории СПП частично были рассмотрены ранее [51–53].

На рис. 2 изображена эквивалентная схема колебательной системы СПП содержащая соответственно C_c – емкость и L_c – индуктивность контура, $R_c(t)$ – резонансное знакопеременное сопротивление контура, управляемое генератором импульсов тока I_e с частотой суперизации. По сути, СПП является приемопередающим устройством с быстрым переключением приемного и передающего режимов работы в течение одного периода суперизирующей частоты [11–15]. Ударные колебания возбуждаются в контуре импульсами тока генератора $I_e(t)$, протекающего через активный элемент СПП в момент его запуска. Поскольку спектр импульсов тока активного элемента достаточно сложен, а затухание контура

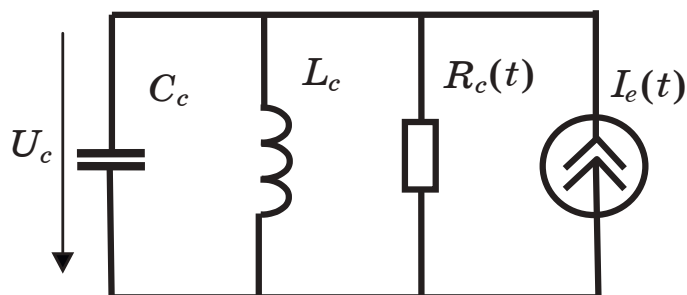


Рис. 2. Эквивалентная схема сверхрегенеративного приемопередатчика

Fig. 2. Equivalent scheme of the superregenerative transceiver

является функцией тока, определить эффект возбуждения вынужденных колебаний в контуре практически можно путем интегрирования дифференциального уравнения колебательной системы СПП.

Математическая модель СПП учитывающая амплитуды и флуктуации внешних сигналов и затухания контура может быть представлена в виде нелинейного стохастического уравнения вида

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + 2\delta[t, u, \xi(t)] \frac{du}{dt} + \omega^2 u = \omega^2 E[t, \zeta(t)], \quad (1)$$

где u – напряжение на емкости контура; $\delta[t, u, \xi(t)]$ – декремент затухания контура; $E[t, \xi(t)]$ – внешнее воздействие в контуре; $\xi(t)$ – флуктуационная составляющая затухания; $\zeta(t)$ – флуктуационная составляющая внешнего воздействия.

Для расчета уровня УК исходное дифференциальное уравнение (1), моделирующее процессы в контуре, необходимо представить в виде явной зависимости от постоянной составляющей тока эмиттера:

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + 2\delta(t) \frac{du_c}{dt} + \omega^2 u_c = -\frac{1}{C} \frac{dI_e(t)}{dt}, \quad (2)$$

где u_c – амплитуда напряжения на элементах контура СПП;

$\delta(t) = \frac{1}{2R_c(t)C_c}$ – декремент затухания контура;

$R_c(t) = \frac{L_c}{R_c C_c}$ – резонансное сопротивление параллельного контура;

R_c – активное сопротивление контура.

Реально ток эмиттера I_e нарастает постепенно (рис. 3). Максимальная амплитуда ударных колебаний U_m оказывается пропорциональна крутизне и амплитуде пускового тока. Если затухание колебательной системы положительно (система диссипативна, декрементная) ударные колебания имеют затухающий характер (рис. 3, 1). В случае отрицательного затухания (инкрементная система) ударные колебания определяют экспоненциальное нарастание амплитуды автоколебаний (рис. 3, 2).

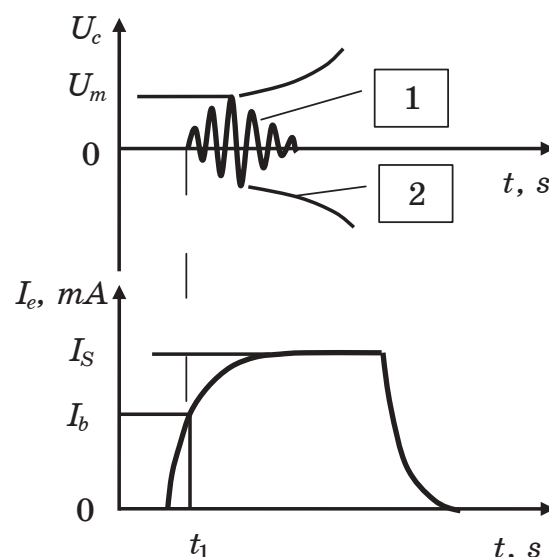


Рис. 3. Механизм ударного возбуждения колебательного контура СПП

Fig. 3. Mechanism of shock excitement of an oscillatory contour of the superregenerative transceiver

Необходимо подчеркнуть, что это условие также предполагает мягкий характер возбуждения автоколебаний в контуре.

Для осуществления численных расчетов далее предполагается, что амплитуда ударных колебаний достаточно мала, а флуктуации тока и регенеративной характеристики не влияют на процесс их формирования. В этом случае математическая модель диссипативной и инкрементной модели колебательной системы может быть задана в виде неоднородного дифференциального уравнения (2). Уравнение колебательной системы СПП представлено в классическом варианте. Далее рассматривается линейный режим работы СПП.

Вынужденные колебания (УК) определяются функцией постоянного тока, которая задается в виде зависимости отображающей реальный закон изменения тока эмиттера транзистора при запуске (рис. 3):

$$I_e(t) = I_b (1 - e^{-\alpha t}), \quad (3)$$

где α – коэффициент, учитывающий крутизну нарастания тока эмиттера; I_b – пусковой ток автогенератора; $I_e = I_b$ – граничный ток, соответствующий моменту самовозбуждения.

Ток эмиттера, вызывая ударные колебания, одновременно управляет затуханием контура. Поэтому необходимо получить выражение, связывающее изменение затухания от тока активного элемента.

Зависимость тока коллектора I_k от управляющего напряжения описывается экспоненциальной функцией [14]:

$$I_k = I_{k0} \left(\exp \left(\frac{U_{be}}{\varphi_t} \right) - 1 \right), \quad (4)$$

где φ_t – температурный потенциал при $T = 300^\circ \text{ K}$; I_{k0} – тепловой ток.

Дифференцируя выражение (4), можно получить формулу для расчета фактора регенерации в виде функции от напряжения U_{be} :

$$\Psi = R_y \frac{I_{k0}}{\varphi_t} \exp \left(\frac{U_{be}}{\varphi_t} \right) - 1, \quad (5)$$

где $\Psi = SR_y - 1$ фактор регенерации автогенератора; R_y – управляющее сопротивление автогенератора;

$S = \frac{dI_k}{dU_{be}}$ – крутизна активного прибора автогенератора.

Дифференциальное приращение Ψ за счет управляющего напряжения находится на основе выражения (5) и может быть представлено следующим соотношением:

$$d\Psi = \frac{1}{\Phi_t}(\Psi + 1)dU_{be}. \quad (6)$$

На рис. 4 приведена статическая регенеративная характеристика транзисторного СВЧ-автогенератора (СРХ) – зависимость фактора регенерации от тока эмиттера [9–11]. Выражение для фактора регенерации автогенератора, работающего в линейном (малосигнальном) режиме, от тока эмиттера может быть представлено в виде:

$$\psi(I_e) = \psi(I_e = I_b) + \left[\frac{d\psi}{dI_e} \right]_{(I_e = I_s)} (I_e - I_b). \quad (7)$$

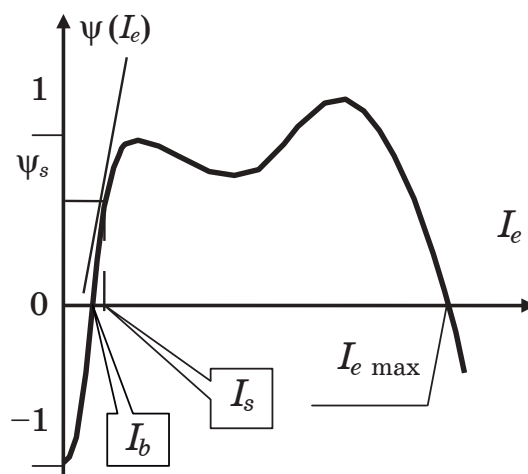


Рис. 4. Статическая регенеративная характеристика транзисторного СВЧ-автогенератора

Fig. 4. Static regenerative characteristic of the transistor microwave oscillator

Для моделирующих расчетов фактор регенерации удобно представить в виде линейной модели так, чтобы выполнялись условия: при $I_e = 0$ $\psi = 1$, а при $I_e = I_b$ $\psi(I_e) = 0$:

$$\psi(I_e) = 1 - \left(\frac{1}{I_b} \right) I_s. \quad (8)$$

Соответственно, затухание колебательной системы можно представить в зависимости от фактора регенерации, и в конечном счете от текущего значения тока эмиттера и далее использовать для решения исходного дифференциального уравнения:

$$\delta(t) = \frac{G_\Sigma}{2C_c} \psi(t). \quad (9)$$

где G_Σ – суммарная проводимость потерь колебательной системы СПП; C_c – эквивалентная емкость контура.

Далее декремент затухания учитывая (9) целесообразно записать следующим образом

$$\delta(t) = \frac{G_{\Sigma}}{2C_c} \left[\left(\frac{1}{I_b} \right) I_s (1 - e^{-\alpha t}) - 1 \right]. \quad (10)$$

При подстановке соотношений для декремента затухания (10) и тока эмиттера (3) в выражение (2), уравнение автогенератора можно представить в виде:

$$\frac{d^2 U_c}{dt^2} + \frac{G_{\Sigma}}{C_c} \left[\left(\frac{1}{I_b} \right) I_s (1 - e^{-\alpha t}) - 1 \right] \frac{dU_c}{dt} + \omega^2 U_c = \frac{1}{C_c} \frac{dI_s (1 - e^{-\alpha t})}{dt}. \quad (11)$$

С помощью полученного соотношения, изменяя величину тока эмиттера в соответствии с выражением (3) от нуля (что соответствует собственному затуханию нерегенерированного контура) до установившегося пускового значения (что соответствует автоколебательному режиму) можно рассчитать амплитуду ударных колебаний для различной формы импульсов тока. При этом учитываются соответствующие изменения затухания контура для декрементного, так и для инкрементного режимов работы СПП.

Компьютерное моделирование процесса развития УК и перехода к автоколебаниям проводилось для транзисторного СВЧ АГ СПП, работающего на частоте 1680 МГц при различных значениях начального затухания нерегенерированного контура – $d_0 = 0.01 \div 0.1$. Пусковой ток I_s выбирался для транзистора BFG-235A в диапазоне значений $I_s = (1 - 10) \text{mA}$, в соответствии с расчетами обобщенной регенеративной характеристики (ОРХ), выполненными в работе [11]. Показатель крутизны нарастания тока импульса запуска α выбирался в диапазоне значений $10^6 - 10^8$. Пусковое значение тока I_s устанавливалось на $0.05 - 0.1 \text{mA}$ больше значения граничного тока I_b . На рис. 5 представлен результат компьютерного моделирования воздействия УК на развитие автоколебаний в СПП в виде зависимости напряжения на контуре от величины начального значения затухания нерегенерированного контура d_0 при пусковом $I_s = 3 \text{mA}$ и граничном $I_b = 2.9 \text{mA}$ токах.

Анализ показывает, что в момент времени $t = 0$ амплитуды УК в обоих случаях одинаковы. При начальном затухании контура $d_0 = 0.03$ УК не спадают до пренебрежимо малых значений флуктуационных колебаний в момент достижения током запуска граничного тока, а переходят в инкрементной области в автоколебания СПП. При большем начальном затухании контура $d_0 = 0.09$ амплитуда УК снижается значительно быстрее. При некотором достаточном интервале времени УК снижают-

ся до уровня флуктуационных колебаний на момент достижения током запуска граничного значения $I_s = I_b$. В этом случае УК не определяют ни начальную величину автоколебаний, ни их фазу, т. е. не оказывают существенного влияния на реальную чувствительность приемного режима СПП.

Также исследовалась зависимость амплитуды УК от скорости нарастания переднего фронта импульса тока запуска. Значения показателя степени $\alpha = 4e7$ и $\alpha = 6e7$ для закона изменения тока эмиттера позволяют снижать скорость нарастания переднего фронта запускающего импульса и уменьшать амплитуду УК. Для двух заданных значений α рассчитанные уровни УК в контуре СПП существенно отличаются. Интерес представляют результаты моделирования зависимости амплитуды УК в контуре СПП от соотношения пускового и граничного токов. Расчет УК для одного значения граничного тока, но с разными значениями пусковых токов показывает, что величина превышения пускового тока над граничным существенно не влияет на уровень УК. Следует отметить, что здесь четко прослеживается другая, очень важная для выбора параметров запуска СПП, тенденция – с уменьшением значения $D = I_s - I_b$ происходит увеличение времени интегрирования внешнего входного сигнала за счет медленного роста амплитуды собственных автоколебаний, начиная от флуктуационного уровня. Интервал между значениями пускового и граничного токов $D = I_s - I_b$ определяет скорость нара-

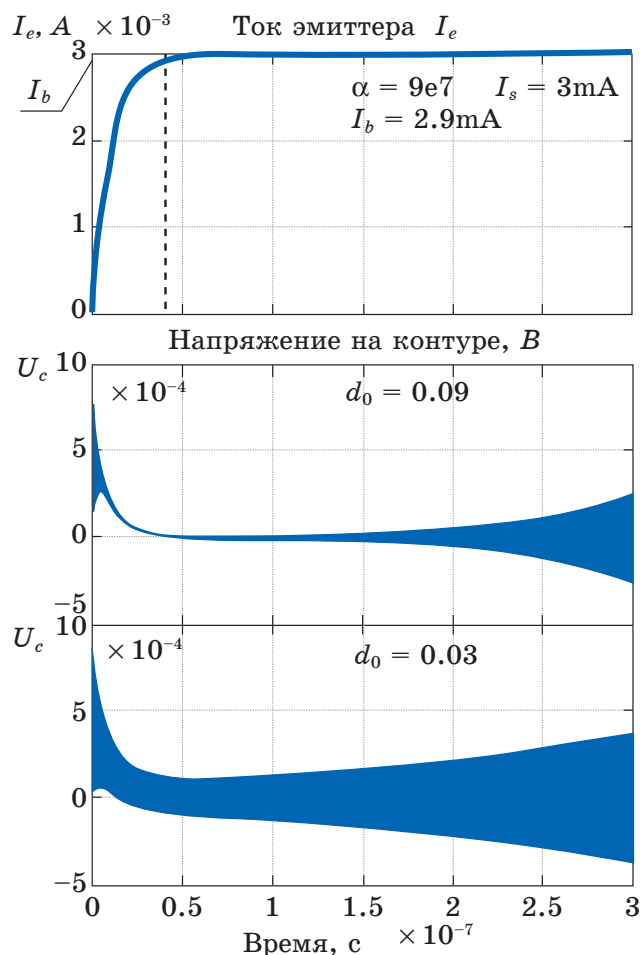


Рис. 5. Зависимость амплитуды УК и автоколебаний контура СПП от собственного затухания d_0 при воздействии импульса пускового тока
Fig. 5. Dependence of amplitude of shock fluctuations and self-oscillations of a contour with from own attenuation of d_0 at influence of an impulse of starting current

стания автоколебаний в инкрементном режиме работы и, следовательно, его уменьшение наиболее существенно влияет на повышение реальной чувствительности СПП. Поэтому при разработке СПП необходимо технически обеспечить возможность точно регулировать превышение пускового тока над граничным значением. Принципиально это можно обеспечить путем стабилизации среднего тока автогенератора СПП.

Анализ расчетов показывает, что:

- начальная амплитуда УК пропорциональна величине и крутизне нарастания пускового тока;
- УК монотонно уменьшаются на декрементном участке работы СПП $I_s \leq I_b$;
- на инкрементном участке скорость нарастания амплитуды автоколебаний существенно зависит от превышения пускового тока граничного значения.

Исследование флуктуационных колебаний в приемном режиме работы СПП

Важнейшим вопросом теории СПП является определение условий достижения высокой чувствительности устройства к внешним сигналам. Для оценки чувствительности СПП необходимо провести анализ и определить амплитуду суммарных флуктуационных колебаний $A_{n\Sigma}$ в его контуре в процессе запуска. Основной причиной колебаний $A_{n\Sigma}$ в основном являются флуктуациями пускового тока СВЧ-транзистора. Флуктуационный ток типа «белого шума» возбуждает в исследуемой колебательной системе квазигармонические колебания, которые в упрощенном варианте могут быть заменены гармоническим током с амплитудой равной эффективной амплитуде флуктуационного тока. При таком подходе в правой части уравнения (2) необходимо записать выражение для производной эффективного значения флуктуационного тока:

$$\frac{d^2U}{dt^2} + 2\delta(t)\frac{dU}{dt} + \omega^2U = \frac{1}{C_c} \frac{dI_{n\Sigma}}{dt}, \quad (12)$$

где $I_{n\Sigma}$ – флуктуационный пусковой ток.

Амплитуда флуктуационного квазигармонического тока зависит от текущей полосы пропускания, тепловых и дробовых колебаний в контуре СВЧ АГ.

$$i_{n\Sigma} = \Delta f \sqrt{(4kTG_\Sigma + 2q[(I_e + I_{k0} + I_e\alpha_0(1 - \alpha_0))].} \quad (13)$$

Поскольку $\Delta f = f_0 d(t)$, а

$$d(t) = \frac{G_\Sigma}{\omega C_c} \psi(t),$$

зависимость полосы пропускания от времени для входного тока, формируемого по закону $I_s(1 - e^{-\alpha t})$ можно записать в виде соотношения связывающего значения пускового и граничного токов автогенератора

$$\Delta f = \frac{G_\Sigma}{2\pi C_c} \left| \frac{I_s(1 - e^{-\alpha t})}{I_b} - 1 \right|. \quad (14)$$

Окончательное выражение для эффективной амплитуды флуктуационного тока принимает вид:

$$i_{n\Sigma} = 2 f_0 \frac{G_\Sigma}{\omega C_c} \left[1 - \left(\frac{1}{I_b} \right) I_s(1 - e^{-\alpha t}) \right] \sqrt{q I_b(1 - e^{\alpha t})}. \quad (15)$$

В процессе компьютерного моделирования использовались дополнительные соотношения для расчета эффективного среднеквадратического значения флуктуационного тока в режиме запуска СПП:

$$i_{n\Sigma} = \sqrt{\Delta f} \sqrt{4kTG_\Sigma + 4qI_e};$$

$$i_{n\Sigma} = 2 \sqrt{\frac{G_\Sigma}{2\pi C_c} \left| \left(\frac{1}{I_b} \right) I_s(1 - e^{-\alpha t}) - 1 \right|} \sqrt{kTG_\Sigma + qI_s(1 - e^{-\alpha t})}. \quad (16)$$

На рис. 6. приведены результаты компьютерного расчета процесса развития флуктуационных колебаний в контуре СВЧ АГ на этапе его запуска. Для заданных параметров пускового тока определена начальная амплитуда УК, их спад на декрементном участке, переход в режим автоколебаний.

Для наглядной оценки суммарных флуктуаций тока $i_{n\Sigma}$ в приемном режиме работы СПП необходимо учитывать действие флуктуаций начальных условий, связанных с граничным током — i_{nb} , и флуктуаций вынужденных колебаний, связанных

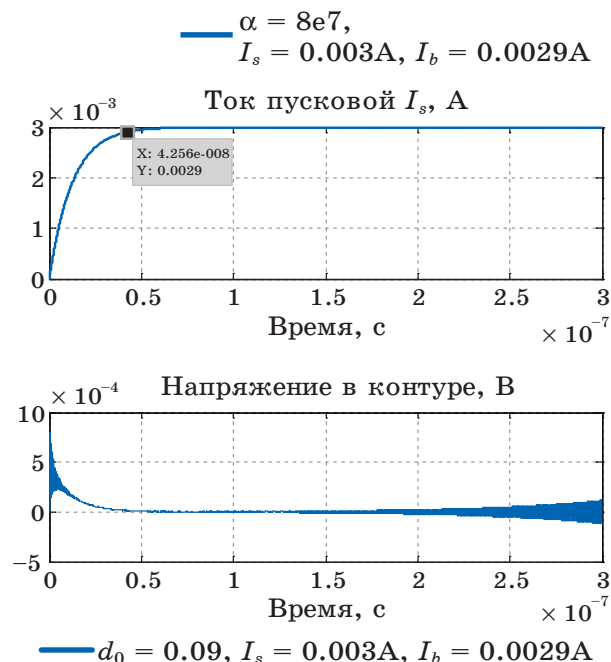


Рис. 6. Процесс развития флуктуационных колебаний в контуре СВЧ-автогенератора

Fig.6. Development of fluctuation fluctuations in a microwave oscillator contour

с пусковым током $-i_{ns}$. Таким образом, суммарный флуктуационный ток, действующий в течение приемного интервала, будет определяться выражением

$$i_{n\Sigma} = \sqrt{i_{nb}^2 + i_{ns}^2}. \quad (17)$$

Эффективную амплитуду напряжения флуктуационных колебаний, которая определяет чувствительность СПП, можно рассчитать по формуле

$$A_{n\Sigma} = \rho \sqrt{i_{nb}^2 + i_{ns}^2}, \quad (18)$$

где

$$\rho = \frac{1}{\omega C_c} -$$

характеристическое сопротивление контура СПП; ω – резонансная угловая частота контура.

Оценка эффективной амплитуды флуктуационных колебаний для рабочей частоты СПП дает следующие значения. Для транзистора BFG-235A, использованного в качестве активного прибора в СПП, пусковой ток составляет $I_s = 10\text{mA}$. На рабочей частоте $f_0 = 1680\text{ МГц}$, полоса пропускания имеет значение порядка $\Delta f = 20\text{ МГц}$. Суммарный флуктуационный ток в режиме запуска СПП имеет величину

$$i_{n\Sigma} = \sqrt{i_{nb}^2 + i_{ns}^2} \approx 5.2e-7\text{ A}.$$

Соответственно эффективная амплитуда напряжения порожденного флуктуационным током при характеристическом сопротивлении колебательного контура СПП порядка 20 Ом будет составлять

$$A_{n\Sigma} = \rho \sqrt{i_{nb}^2 + i_{ns}^2} = 20 \cdot 5.2e-7 = 1e-5\text{ В. или } 10\text{ мкВ.}$$

Из анализа выражений (16) – (18) следует вывод, что для повышения чувствительности СПП необходимо обеспечивать режимы запуска СВЧ-автогенератора с минимальными величинами граничного I_b и пускового I_s токов.

Оценка полосы пропускания при нулевом значении затухания контура СВЧ АГ

Для оценки предельной чувствительности СПП необходимо определить минимальную полосу пропускания при нулевом значении затухания контура СВЧ АГ. На рис. 4 приведена статическая регенеративная характеристика (СРХ) транзисторного СВЧ-автогенератора – зависимость фактора регенерации от тока эмиттера, которая дает возможность оценить влияние флуктуаций пускового тока автогенератора на флуктуации фактора ре-

генерации [16–18]. Это принципиально позволяет определить эффективную полосу пропускания контура СПП, в том числе при нулевом среднем значении затухания. Далее принимается допущение, что случайные изменения физических параметров СВЧ-транзистора на фактор регенерации влияют слабо и не рассматриваются. Учитывая практически незначительное превышение пускового тока I_s относительно граничного I_b ($I_s \rightarrow I_b$), для расчетов используется линейное приближение выражения для фактора регенерации (7).

На рис. 5 изображена плотность распределения флуктуационной составляющей пускового тока $P(I_e)$, которая практически имеет нормальный закон распределения. Учитывая линейный характер зависимости $\psi(I_e)$ для малых отклонений пускового тока, можно утверждать, что плотность распределения фактора регенерации также будет подчиняться нормальному распределению. Поэтому среднеквадратичное значение флуктуаций фактора регенерации можно оценить с помощью соотношения:

$$\sigma_\psi = \left[\frac{d\psi}{dI_e} \right]_{(I_e=I_b)} i_{n\Sigma}. \quad (19)$$

Соответственно минимальная эффективная полоса пропускания колебательного контура Δf_n на границе самовозбуждения при $I_b = I_e$ может быть определена с помощью выражения:

$$\sigma_f = f_0 \left[\frac{d\psi}{dI_e} \right]_{(I_e=I_b)} i_{n\Sigma}. \quad (20)$$

Таким образом, минимальное затухание регенерированного контура СПП в течение приемного интервала определяется эффективным значением флуктуаций пускового тока из-за естественных и технических шумов. Соответственно минимальная полоса пропускания контура СПП определяется эффективным значением флуктуаций затухания контура СПП. Например, в указанном диапазоне СВЧ минимальная полоса приема СПП для сделанных выше оценок флуктуационного тока при реальном значении

$$\left[\frac{d\psi}{dI_e} \right]_{(I_e=I_b)} \approx 100$$

составляет:

$$2\sigma_f = \Delta f_b = f_0 \left[\frac{d\psi}{dI_e} \right]_{(I_e=I_b)} i_{n\Sigma} \approx 10^5, [Hz]. \quad (21)$$

При экспериментальных исследованиях получить такую полосу пропускания в диапазоне частот 1680 ± 10 МГц оказалось

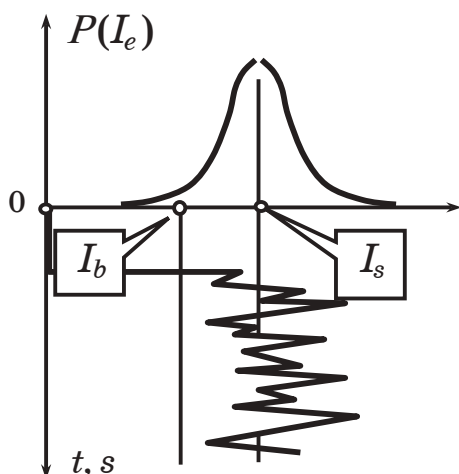


Рис. 7. Плотность распределения пускового тока автогенератора

Fig.7. Distribution density of starting current of the oscillator

возможным при достижении времени задержки переднего фронта радиоимпульсов СПП около 3–6 мкс. При этом разница пускового и граничного токов в экспериментальном макете СПП составляла 50–75 мкА. Предельная чувствительность СПП составляет 125–130 дБ/Вт. Значение пускового тока СВЧ-автогенератора составляет 5–8 мА. При этом величина тока эмиттера транзистора BFG-235A в стационарном (передающем) режиме СВЧ АГ находится в пределах 160–200 мА, а выходная импульсная мощность составляет 1–1,5 Вт.

Оценка суммарного воздействия ударных и флуктуационных колебаний на параметры СПП

Далее представляется необходимым рассмотреть развитие колебательного процесса в СПП при суммарном воздействии ударных и флуктуационных колебаний в контуре. Для упрощения расчетов флуктуационные колебания моделируются эквивалентным гармоническим сигналом. Как ранее указывалось, режим работы транзистора на приемном интервале – малосигнальный, регенеративная характеристика может быть представлена линейной зависимостью при небольших значениях тока эмиттера, соизмеримых со значением граничного тока. Следовательно, допустимо суммировать воздействие токов ударных и флуктуационных колебаний. Уравнение СПП (2) для данных условий запуска можно записать в виде:

$$\frac{d^2 U_c}{dt^2} + 2\delta(t) \frac{dU_c}{dt} + \omega^2 U_c = \frac{1}{C_c} \frac{d(I_e(t) + I_{n\Sigma})}{dt}. \quad (22)$$

Декремент затухания $\delta(t)$ меняется во времени по закону изменения линеаризованного фактора регенерации СПП в диапазоне значений тока запуска от нуля до пускового тока и оценивается соотношением (10). Закон изменения входного пускового тока импульса суперизации соответствует выражению (3). Для учета совместного влияния ударных и флуктуационных колебаний необходимо просуммировать эти токи, продифференцировать выражение (16) и ввести результат (17) в уравнение (16):

$$\frac{d[I_s(1-e^{-\alpha t}) + 2\sqrt{\frac{G_\Sigma}{2\pi C_c} \left| \left(\frac{1}{I_b} \right) I_s(1-e^{-\alpha t}) - 1 \right|} \times \sqrt{kTG_\Sigma + qI_s(1-e^{-\alpha t})} \sin(2\pi ft)]}{dt}. \quad (23)$$

Результаты компьютерного моделирования расчета суммарных колебаний представлены на рис. 8.

На верхнем графике (рис. 8) показан закон изменения тока запуска СВЧ-АГ $I_e(t)$, формируемый за счет суперлирующего импульса.

Средний график (рис. 8) представляет процесс изменения полосы пропускания во времени. Полоса пропускания уменьшается от значения Δf_0 , соответствующего начальному затуханию нерегенерированного контура d_0 декрементного участка, до минимального значения Δf_n , определяемого уровнем флуктуаций фактора регенерации СПП при достижении током запуска граничного уровня I_b . После изменения знака затухания от положительного значения к отрицательному, рассчитанное значение полосы пропускания Δf принимает постоянное значение на инкрементном участке работы СВЧ АГ.

При изменении частоты гармонических колебаний, имитирующих флуктуационные колебания, относительно резонансной частоты контура существует возможность проследить воздействие внешнего квазигармонического

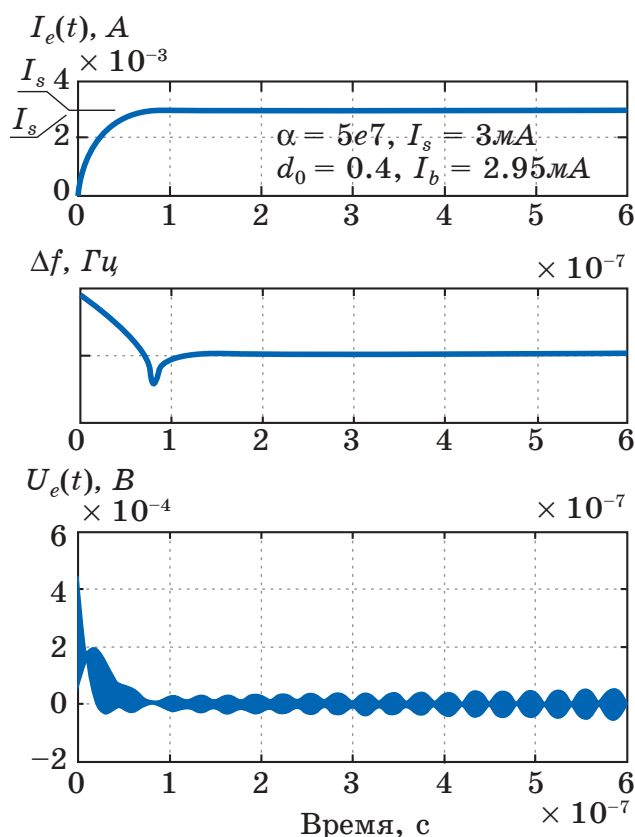


Рис. 8. Пусковой ток $I_e(t)$, полоса пропускания Δf , амплитуда автоколебаний в контуре СПП при одновременном учете ударных и внешних квазигармонических колебаний

Fig. 8. Starting current of $I_e(t)$, Δf bandwidth, amplitude of self-oscillations in a contour with at simultaneous accounting of shock and external quasiharmonic oscillations

го сигнала и УК в виде биений на переходной процесс развития автоколебаний и оценить их количественные показатели.

В целом выбранная модель СВЧ АГ и компьютерное моделирование предоставляет возможность оценить качественно и количественно параметры колебательного процесса в контуре для различных внешних сигналов, действующих на СВЧ АГ. Проведенный анализ показал, что в конечном счете для обеспечения высокой чувствительности СПП величину пускового тока I_n и скорость нарастания α необходимо выбирать таким образом, чтобы к моменту выполнения условия самовозбуждения амплитуда A_{sh} УК была меньше амплитуды флуктуаций $A_{n\Sigma}$:

$$A_{sh} \leq A_{n\Sigma}. \quad (24)$$

Необходимо сделать некоторые замечания относительно спектра излучения СПП который принципиально должен иметь шумовой характер поскольку появление дискретных составляющих в спектре связано с влиянием УК. Результаты экспериментальных исследований позволили выработать критерий оценки уровня УК, который заключается в определении соотношения амплитуд дискретной спектральной составляющей и сплошного спектра. Предложенный метод использовался при измерении предельной чувствительности опытных образцов СПП. Под предельной чувствительностью понимается мощность внешнего непрерывного гармонического сигнала на резонансной частоте СПП, при которой отношение уровней дискретной спектральной составляющей и сплошного спектра равно единице. Результаты измерений показывают, что предельная чувствительность СПП АРЗ на частоте 1680 МГц составляет минус 125–130 дБ при полосе пропускания 2–10 МГц.

Заключение

Результаты проведенных исследований позволяют сделать выводы, которые необходимо учитывать при проектировании конструкций СПП:

1. Начальная амплитуда УК пропорциональна величине и крутизне нарастания пускового тока I_s . Амплитуда УК монотонно уменьшается на декрементном участке работы СПП. Скорость снижения амплитуды УК существенно зависит от собственного затухания контура СПП.

2. На инкрементном участке работы (при превышении пусковым током эмиттера граничного значения $I_e \geq I_b$) скорость нарастания амплитуды автоколебаний СПП определяется суммарной амплитудой ударных и флуктуационных колебаний, а также существенно зависит от величины отрицательного за-

тухания контура, от превышения пускового тока I_e граничного значения I_b : $D = I_e - I_b$.

3. Для снижения влияния УК на чувствительность СПП величину пускового тока I_s , скорость нарастания переднего фронта импульса запуска $I_e(t)$ необходимо выбирать таким образом, чтобы к моменту выполнения условия самовозбуждения $I_e(t) = I_b$ амплитуда УК A_{sh} успевала снизиться до значений меньших, чем амплитуда флуктуационных колебаний $A_{n\Sigma}$: $A_{sh} \geq A_{n\Sigma}$.

4. При экспериментальных исследованиях СПП влияние УК может эффективно оцениваться путем анализа спектра излучения. В качестве критерия оценки уровня УК предлагается использовать отношение амплитуд дискретных и шумовых составляющих спектра излучения СПП.

5. В классических импульсных автогенераторах линейчатый спектр излучения обусловлен влиянием ударных колебаний за счет импульсов пускового тока активного элемента.

В заключение следует отметить, что современные отечественные радиолокационные СР «Вектор-М», МАРЛ разработаны и успешно эксплуатируются на сети Росгидромета РФ. В составе аэрологических радиозондов типа МРЗ-3, МРЗ-3МК, РЗМ-2 применяются транзисторные СПП, конструкции которых постоянно совершенствуются.

Список литературы

1. Горелик Г. С. Линейные резонансные явления в суперрегенеративном приемнике. *Электросвязь*. 1939;(6):29–49.
2. Гуткин Л. С. Действие помех на суперрегенератор. Ч. 1. *Радиотехника*. 1946;1(9):40–62.
3. Whitehead I. R. *Super-Regenerative Receivers*. Cambridge University Press; 1950.
4. Томсон В. Суперрегенеративные усилители на сантиметровых волнах. *Зарубежная радиоэлектроника*. 1962;(8):105–112.
5. Белкин М. К. *Сверхрегенеративный радиоприем*. Киев: Техника; 1968.
6. Кравченко Г. И., Марков Ф. В., Гуревич В. Л. и др. Ударные колебания и пороговая чувствительность сверхрегенеративных усилителей. *Радиотехника*. 1973(6):15.
7. Белкин М. К., Кравченко Г. И., Скоробутов Ю. Г., Стрюков Б. А. *Сверхрегенераторы*. М.: Радио и связь; 1983.
8. Ермаков В. И., Кузенков А. Ф., Юрманов В. А. *Системы зондирования атмосферы*. Л.: Гидрометиздат; 1977.
9. Armstrong E. H. Some recent developments of regenerative circuits. *Proc. IRE*. 1922;10:244–260.
10. Moncunill-Geniz F. X., Pala-Schonwalder P., Mas-Casals O. A generic approach to the theory of superregenerative reception. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I*. 2005;52(1):54–70.

11. Chen J. Y., Flynn M. P., Hayes J. P. A 3.6mW 2.4-GHz multi-channel super-regenerative receiver in 130nm CMOS. In: *Proc. IEEE Custom Integrated Circ. Conference, September 2005*, pp. 361–364.
12. Otis B., Chee Y. H., Rabaey J. A 400uW-RX, 1.6mW-TX super-regenerative transceiver for wireless sensor networks. In: *Digest of Technical Papers of the IEEE Int. Solid-State Circ. Conference, San Francisco, February 2005*. Vol. 1, pp. 396–397, 606.
13. Joehl N., Dehollain C., Favre P., Deval P., Declercq M. A low-power 1-GHz super-regenerative transceiver with time-shared PLL control. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2001;36:1025–1031.
14. Favre P., Joehl N., Vouilloz A., Deval P., Dehollain C., Declercq M. J. A 2-V 600- μ A 1-GHz BiCMOS superregenerative receiver for ISM applications. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 1998;33:2186–2196.
15. Moncunill-Geniz F. X., Pala-Schonwalder P., Dehollain C., Joehl N., Declercq M. A 2.4-GHz DSSS superregenerative receiver with a simple delay-locked loop. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2005;15:499–501.
16. Vouilloz A., Declercq M., Dehollain C. A low-power CMOS super-regenerative receiver at 1 GHz. *IEEE Journal Solid-state circuits*. 2001;36:440–451.
17. Vouilloz A., Declercq M., Dehollain C. Selectivity and sensitivity performances of superregenerative receivers. *Proc. ISCAS'98*. 1998;4:325–328.
18. Moncunill-Geniz F. X., Dehollain C., Joehl N., Declercq M., Pala-Schonwalder P. A 2.4-GHz Low-Power Superregenerative RF Front-End for High Data Rate Applications. In: *Microwave Conference, 36th European, September 2006*, pp. 1537–1540.
19. Favre P., Joehl N., Declercq M., Dehollain C., Deval P. A 2V, 600 mkA, 1 GHz, BiCMOS super-regenerative receiver. In: *ISSCC Digest of Technical Papers, San Francisco, 1998*, vol. 41, pp. 128–129.
20. Vouilloz A., Declercq M., Dehollain C. Selectivity and sensitivity performances of superregenerative receivers. In: *CD-ROM and Proceeding of ISCAS 98' Conference, Monterey (USA), 1998*.
21. Vouilloz A., Dehollain C., Declercq M. Modelisation and Simulation of Integrated Super-Regenerative Receivers. In: *CD-ROM and Proceeding of ICECS 99' Conference, Pafos (Cyprus), 5–8 September 1999*, vol. 1, pp. 521–524.
22. Koukab A., Declercq M., Dehollain C. Analysis and Simulation of Substrate Coupling in RF IC. In: *Proceedings of the International Workshop on Low Power RF integrated Circuits, Lausanne (Switzerland), 19–20 October 1999*.
23. Favre P., Joehl N., Declercq M., Dehollain C., Deval P. A PLL stabilized Super-Regenerative Transceiver. In: *Proceedings of the International Workshop on Low Power RF integrated Circuits, Lausanne (Switzerland), 19–20 October 1999*.
24. A. Vouilloz, Dehollain C., Declercq M. A Low Power CMOS Super-Regenerative Receiver at 1 GHz. In: *CD-ROM and Proceedings of CICC 2000' Conference, Orlando (USA), 21–24 May 2000*.

25. Joehl N., Favre P., Deval P., Vouilloz A., Dehollain C., Declercq M. A BiCMOS Micropower 1 GHz Super-Regenerative Receiver. In: *Proceeding of URSI ISSSE 98' Conference, Pisa (Italy) 1998*, pp. 74–78.
26. Favre P., Joehl N., Vouilloz A., Deval P., Dehollain C., Declercq M. A 2V 600 uA 1 GHz BiCMOS Super-Regenerative Receiver for ISM Applications. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 1998;33(12):2186–2196.
27. Dehollain C., Declercq M., Joehl N., Favre P., Deval P., Chenes P., Sultan, Bellini G., Besseux P., Valence V., Magnin R. Low Power Wireless Data Transmission Systems at Short Distance for ISM Applications. In: *Proceeding of BSD LPD 2000' Workshop, Rapallo (Italy), 25 and 28 July 2000*, pp. 213–243.
28. Favre P., Joehl N., Deval P., Declercq M., Dehollain C. A Low Power 1 GHz Super-Regenerative Transceiver with time-shared PLL control. In: *Proceedings of the European Solid-State Circuits Conference (ESSCIRC), Stockholm (Sweden), 19–21 September 2000*, pp. 84–87.
29. Vouilloz A., Declercq M., Dehollain C. A low-power CMOS super-regenerative receiver at 1 GHz. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2001;36(3):440–451. DOI: 10.1109/4.910483.
30. Bradley W. E. Superregenerative. *Electronics*. 1948;(Sept.):96–98.
31. Joehl N., Dehollain C., Favre P., Deval P., Declercq M. A low-power 1 GHz Super-Regenerative Transceiver with time-shared PLL control. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2001;36(7):1025–1031. DOI: 10.1109/4.933457.
32. Moncunill-Geniz F., Pala-Schonwalder P., Mas-Casals O. A generic approach to the theory of superregenerative reception. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2005;52(1):54–70.
33. Vouilloz A., Declercq M., Dehollain C. Selectivity and sensitivity performances of superregenerative receivers. ISC AS 98. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*.
34. Lee D., Mercier P. P. Noise Analysis of Phase-Demodulating Receivers Employing Super-Regenerative Amplification. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2017;PP(99):1–13. DOI: 10.1109/TMTT.2017.2686860.
35. Hernandez L., Paton S. A superregenerative receiver for phase and frequency modulated carriers. In: *Proceedings of the 2002 International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS 2002, Scottsdale, Arizona, USA, May 26–29, 2002*. IEEE; 2002, pp. 81–84. DOI: 10.1109/ISCAS.2002.1010165.
36. Insam E. *Designing Super-Regenerative Receivers*. Electronics World; 2002.
37. Frey D. R. Improved Super-Regenerative Receiver Theory. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2013;60(12):3267–3278. DOI: 10.1109/TCSI.2013.2265971.
38. Frey D. Synchronous filtering. In: *2006 IEEE Transactions on Circuits and Systems*.
39. Pala-Schonwalder P., Moncunill-Geniz F., Bonet-Dalmau X., Aguila-Lopez F. D., Giralt-Mas J. R. A BPSK superregenerative receiver.

Preliminary results. In: *2009 TEEE International Symposium on Circuits and Systems, Taipei, 24–27 May 2009*. DOI: 10.1109/ISCAS.2009.5118061.

40. Lathi B. P. *Signal processing and linear systems*. New York: Oxford University Press; 2016.

41. Thoppay P. E., Dehollain C., Declercq M. J. Noise analysis in super-regenerative receiver systems. *2008 Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics, Istanbul, 22 June–25 April 2008*. DOI: 10.1109/RME.2008.4595757.

42. Feick R., Rojas O. Modeling and simulation of the superregenerative receiver. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 1997;43(2):92–102.

43. Bonet-Dalmau J., Moncunill-Geniz F. X., Pala-Schonwalder P., Aguila-Lopez F. D., Giralt-Mas R. Frequency Domain Analysis of Super-regenerative Receivers in the Linear and the Logarithmic Modes. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2012;59(5):1074–1084. DOI: 10.1109/TCSI.2012.2185296.

44. Иванов В. Э. Исследование регенеративной характеристики транзисторного СВЧ-автогенератора. В: Панченко Б. А. (ред.) *Радиотехнические системы локации пространственно-распределенных объектов: Оптимизация и моделирование*. Свердловск: УПИ; 1981. С. 93–99.

45. Иванов В. Э. *Исследование динамической регенеративной характеристики транзисторного СВЧ-автогенератора*. Свердловск; 1981.

46. Кудинов С. И., Иванов В. Э. Исследование обобщенной регенеративной характеристики транзисторного СВЧ-автогенератора. В: *СВЯЗЬПРОМ 2006: труды межд. науч.-практ. конф. на III Евро-Азиатского форуме «СВЯЗЬПРОМЭКСПО 2006», Екатеринбург, 3–5 мая 2006*. Екатеринбург: Компания Реал – Медиа; 2006. С. 106–108.

47. Иванов В. Э. *Исследование механизма вторичной реакции сверхрегенеративного приемопередатчика*. Свердловск; 1979.

48. Иванов В. Э., Кудинов С. И. Некоторые вопросы нелинейной теории сверхрегенеративного приемопередатчика. В: *Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем: труды Третьей всерос. науч.-практ. конф. (с участием стран СНГ)*. Ульяновск; 2001.

49. Иванов В. Э., Фридзон М. Б., Ессяк С. П. *Радиозондирование атмосферы. Технические и метрологические аспекты разработки и применения радиозондовых измерительных средств*. Екатеринбург: УрО РАН; 2004.

50. Иванов В. Э., Гусев А. В., Игнатков К. А. и др. Современное состояние и перспективы развития систем радиозондирования атмосферы в России. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2015;(9):3–49.

51. Иванов В. Э., Кудинов С. И. Исследование влияния флуктуационных и ударных колебаний на чувствительность сверхрегенеративного приемопередатчика. В: *СВЯЗЬ-ПРОМ 2007: труды межд. науч.-практ. конф. на IV Евро-Азиатском форуме «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2007», Екатеринбург, 2–4 мая 2007*. Екатеринбург: Компания Реал – Медиа; 2007. С. 78–80.

52. Кудинов С. И., Иванов В. Э. Ударные колебания и чувствительность сверхрегенеративного приемопередатчика. В: *Наука – Образова-*

ние – Производство: «Опыт и перспектива развития»: материалы рег. науч.-техн. конф. Нижний Тагил; 2007. С. 171–173.

53. Кудинов С. И., Иванов В. Э. Исследование флуктуаций затухания колебательной системы сверхрегенеративного приемопередатчика в приемном режиме. В: *СВЯЗЬ-ПРОМ 2007: труды межд. науч.-практ. конф. на IV Евро-Азиатском форуме «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2007», Екатеринбург, 2–4 мая 2007*. Екатеринбург: Компания Реал – Медиа; 2007. С. 91–93.

References

1. Gorelik G. S. The linear resonant phenomena in the superregenerative receiver. *Elektrosvyaz*. 1939;(6):29–49. (In Russ.)
2. Gutkin L. S. Action of hindrances on a superregenerator. Part 1. *Radiotekhnika*. 1946;1(9):40–62. (In Russ.)
3. Whitehead I. R. *Super-Regenerative Receivers*. Cambridge University Press; 1950.
4. Tomson W. Superregenerative amplifiers on centimetric waves. *Zarubezhnaya radioelektronika*. 1962;(8):105–112. (In Russ.)
5. Belkin M. K. *Superregenerative radio reception*. Kiev: Tekhnika; 1968. (In Russ.)
6. Kravchenko G. I., Markov F. V., Gurevich V. L. et al. Shock fluctuations and threshold sensitivity of superregenerative amplifiers. *Radiotekhnika*. 1973(6):15. (In Russ.)
7. Belkin M. K., Kravchenko G. I., Skorobutov Yu. G., Stryukov B. A. *Superregenerators*. Moscow: Radio i svyaz; 1983. (In Russ.)
8. Ermakov V. I., Kuzenkov A. F., Yurmanov V. A. *Systems of sounding of the atmosphere*. Leningrad: Gidrometizdat; 1977. (In Russ.)
9. Armstrong E. H. Some recent developments of regenerative circuits. *Proc. IRE*. 1922;10:244–260.
10. Moncunill-Geniz F. X., Pala-Schonwalder P., Mas-Casals O. A generic approach to the theory of superregenerative reception. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I*. 2005;52(1):54–70.
11. Chen J. Y., Flynn M. P., Hayes J. P. A 3.6mW 2.4-GHz multi-channel super-regenerative receiver in 130nm CMOS. In: *Proc. IEEE Custom Integrated Circ. Conference, September 2005*, pp. 361–364.
12. Otis B., Chee Y. H., Rabaey J. A 400uW-RX, 1.6mW-TX super-regenerative transceiver for wireless sensor networks. In: *Digest of Technical Papers of the IEEE Int. Solid-State Circ. Conference, San Francisco, February 2005*. Vol. 1, pp. 396–397, 606.
13. Joehl N., Dehollain C., Favre P., Deval P., Declercq M. A low-power 1-GHz super-regenerative transceiver with time-shared PLL control. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2001;36:1025–1031.
14. Favre P., Joehl N., Vouilloz A., Deval P., Dehollain C., Declercq M. J. A 2-V 600- μ A 1-GHz BiCMOS superregenerative receiver for ISM applications. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 1998;33:2186–2196.
15. Moncunill-Geniz F. X., Pala-Schonwalder P., Dehollain C., Joehl N., Declercq M. A 2.4-GHz DSSS superregenerative receiver with a simple delay-locked loop. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2005;15:499–501.

16. Vouilloz A., Declercq M., Dehollain C. A low-power CMOS super-regenerative receiver at 1 GHz. *IEEE Journal Solid-state circuits*. 2001;36:440–451.
17. Vouilloz A., Declercq M., Dehollain C. Selectivity and sensitivity performances of superregenerative receivers. *Proc. ISCAS'98*. 1998;4:325–328.
18. Moncunill-Geniz F. X., Dehollain C., Joehl N., Declercq M., Pala-Schonwalder P. A 2.4-GHz Low-Power Superregenerative RF Front-End for High Data Rate Applications. In: *Microwave Conference, 36th European, September 2006*, pp. 1537–1540.
19. Favre P., Joehl N., Declercq M., Dehollain C., Deval P. A 2V, 600 mkA, 1 GHz, BiCMOS super-regenerative receiver. In: *ISSCC Digest of Technical Papers, San Francisco, 1998*, vol. 41, pp. 128–129.
20. Vouilloz A., Declercq M., Dehollain C. Selectivity and sensitivity performances of superregenerative receivers. In: *CD-ROM and Proceeding of ISCAS 98' Conference, Monterey (USA), 1998*.
21. Vouilloz A., Dehollain C., Declercq M. Modelisation and Simulation of Integrated Super-Regenerative Receivers. In: *CD-ROM and Proceeding of ICECS 99' Conference, Pafos (Cyprus), 5–8 September 1999*, vol. 1, pp. 521–524.
22. Koukab A., Declercq M., Dehollain C. Analysis and Simulation of Substrate Coupling in RF IC. In: *Proceedings of the International Workshop on Low Power RF integrated Circuits, Lausanne (Switzerland), 19–20 October 1999*.
23. Favre P., Joehl N., Declercq M., Dehollain C., Deval P. A PLL stabilized Super-Regenerative Transceiver. In: *Proceedings of the International Workshop on Low Power RF integrated Circuits, Lausanne (Switzerland), 19–20 October 1999*.
24. Vouilloz A., Dehollain C., Declercq M. A Low Power CMOS Super-Regenerative Receiver at 1 GHz. In: *CD-ROM and Proceedings of CICC 2000' Conference, Orlando (USA), 21–24 May 2000*.
25. Joehl N., Favre P., Deval P., Vouilloz A., Dehollain C., Declercq M. A BiCMOS Micropower 1 GHz Super-Regenerative Receiver. In: *Proceeding of URSI ISSSE 98' Conference, Pisa (Italy) 1998*, pp. 74–78.
26. Favre P., Joehl N., Vouilloz A., Deval P., Dehollain C., Declercq M. A 2V 600 uA 1 GHz BiCMOS Super-Regenerative Receiver for ISM Applications. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 1998;33(12):2186–2196.
27. Dehollain C., Declercq M., Joehl N., Favre P., Deval P., Chenes P., Sultan, Bellini G., Besseux P., Valence V., Magnin R. Low Power Wireless Data Transmission Systems at Short Distance for ISM Applications. In: *Proceeding of BSD LPD 2000' Workshop, Rapallo (Italy), 25 and 28 July 2000*, pp. 213–243.
28. Favre P., Joehl N., Deval P., Declercq M., Dehollain C. A Low Power 1 GHz Super-Regenerative Transceiver with time-shared PLL control. In: *Proceedings of the European Solid-State Circuits Conference (ESSCIRC), Stockholm (Sweden), 19–21 September 2000*, pp. 84–87.
29. Vouilloz A., Declercq M., Dehollain C. A low-power CMOS super-regenerative receiver at 1 GHz. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2001;36(3):440–451. DOI: 10.1109/4.910483.

30. Bradley W. E. Superregenerative. *Electronics*. 1948;(Sept.):96–98.
31. Joehl N., Dehollain C., Favre P., Deval P., Declercq M. A low-power 1 GHz Super-Regenerative Transceiver with time-shared PLL control. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2001;36(7):1025–1031. DOI: 10.1109/4.933457.
32. Moncunill-Geniz F., Pala-Schonwalder P., Mas-Casals O. A generic approach to the theory of superregenerative reception. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2005;52(1):54–70.
33. Vouilloz A., Declercq M., Dehollain C. Selectivity and sensitivity performances of superregenerative receivers. ISC AS 98. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*.
34. Lee D., Mercier P. P. Noise Analysis of Phase-Demodulating Receivers Employing Super-Regenerative Amplification. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2017;PP(99):1–13. DOI: 10.1109/TMTT.2017.2686860.
35. Hernandez L., Paton S. A superregenerative receiver for phase and frequency modulated carriers. In: *Proceedings of the 2002 International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS 2002, Scottsdale, Arizona, USA, May 26–29, 2002*. IEEE; 2002, pp. 81–84. DOI: 10.1109/ISCAS.2002.1010165.
36. Insam E. *Designing Super-Regenerative Receivers*. Electronics World; 2002.
37. Frey D. R. Improved Super-Regenerative Receiver Theory. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2013;60(12):3267–3278. DOI: 10.1109/TCSI.2013.2265971.
38. Frey D. Synchronous filtering. In: *2006 IEEE Transactions on Circuits and Systems*.
39. Pala-Schonwalder P., Moncunill-Geniz F., Bonet-Dalmau X., Aguila-Lopez F. D., Giralt-Mas J. R. A BPSK superregenerative receiver. Preliminary results. In: *2009 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Taipei, 24–27 May 2009*. DOI: 10.1109/ISCAS.2009.5118061.
40. Lathi B. P. *Signal processing and linear systems*. New York: Oxford University Press; 2016.
41. Thoppay P. E., Dehollain C., Declercq M. J. Noise analysis in super-regenerative receiver systems. *2008 Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics, Istanbul, 22 June–25 April 2008*. DOI: 10.1109/RME.2008.4595757.
42. Feick R., Rojas O. Modeling and simulation of the superregenerative receiver. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 1997;43(2):92–102.
43. Bonet-Dalmau J., Moncunill-Geniz F. X., Pala-Schonwalder P., Aguila-Lopez F. D., Giralt-Mas R. Frequency Domain Analysis of Super-regenerative Receivers in the Linear and the Logarithmic Modes. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2012;59(5):1074–1084. DOI: 10.1109/TCSI.2012.2185296.
44. Ivanov V. E. A research of regenerative characteristic of the transistor microwave oscillator. In: Panchenko B. A. (ed.) *Radio systems for locating spatially distributed objects: Optimization and modeling*. Sverdlovsk: UPI; 1981, pp. 93–99. (In Russ.)

45. Ivanov V. E. *Research of dynamic regenerative characteristics of the transistor microwave oscillator*. Sverdlovsk; 1981. (In Russ.)
46. Kudinov S. I., Ivanov V. E. Investigation of the Generalized Regenerative Characteristics of a Transistor Microwave Oscillator. In: *SVYAZPROM 2006: proceedings of the international scientific-practical conference at the III Euro-Asian Forum "SVYAZPROMEXPO 2006", Ekaterinburg, 3–5 May 2006*. Ekaterinburg: Kompaniya Real – Media; 2006, pp. 106–108. (In Russ.)
47. Ivanov V. E. *Investigation of the mechanism of the secondary reaction of a superregenerative transceiver*. Sverdlovsk; 1979. (In Russ.)
48. Ivanov V. E., Kudinov S. I. Some questions of the nonlinear theory of a superregenerative transceiver. In: *Modern problems of the creation and operation of radio systems: the works of the Third All-Russian Scientific and Practical Conference (with the participation of the CIS countries)*. Uliyanovsk; 2001. (In Russ.)
49. Ivanov V. E., Fridzon M. B., Essyak S. P. *Radio sounding of the atmosphere. Technical and metrological aspects of the development and application of radiosonde measuring devices*. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2004. (In Russ.)
50. Ivanov V. E., Gusev A. V., Ignatkov K. A. et al. Current status and development prospects of atmosphere radio sensing systems in Russia. *Journal Achievements of Modern Radioelectronics*. 2015;(9):3–49. (In Russ.)
51. Ivanov V. E., Kudinov S. I. Investigation of the influence of fluctuation and shock oscillations on the sensitivity of a superregenerative transceiver. In: *SVYAZ-PROM 2007: proceedings of the international scientific-practical conference at the IV Euro-Asian Forum "SVYAZ-PROMEXPO 2007", Ekaterinburg, 2–4 May 2007*. Ekaterinburg: Kompaniya Real – Media; 2007, pp. 78–80. (In Russ.)
52. Kudinov S. I., Ivanov V. E. Shock oscillations and sensitivity of a superregenerative transceiver. In: *Science – Education – Production: "Experience and Prospects for Development": materials of a regional scientific and technical conference*. Nizhniy Tagil; 2007, pp. 171–173. (In Russ.)
53. Kudinov S. I., Ivanov V. E. Investigation of the attenuation fluctuations of the oscillatory system of a superregenerative transceiver in a receiving mode. In: *SVYAZ-PROM 2007: proceedings of the international scientific-practical conference at the IV Euro-Asian Forum "SVYAZ-PROMEXPO 2007", Ekaterinburg, 2–4 May 2007*. Ekaterinburg: Kompaniya Real – Media; 2007, pp. 91–93. (In Russ.)

Информация об авторах

Иванов Вячеслав Элизбарович, доктор технических наук, профессор Института радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (г. Екатеринбург). Сфера научных интересов – системы радиозондирования атмосферы, системы ближней радиолокации и связи, приемопередающие устройства СВЧ-диапазона; e-mail: v.e.ivanovekt@gmail.com

Кудинов Сергей Иванович, кандидат технических наук, доцент департамента Радиоэлектроники и связи Института радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (г. Екатеринбург). Сфера научных интересов – системы радиозондирования атмосферы, системы ближней радиолокации и связи, приемопередающие устройства СВЧ-диапазона; e-mail: s.kudinov@urfu.ru

Information about the authors

Sergey I. Kudinov is a candidate of technical Sciences, associate Professor of the Department of radioelectronics and communications of the Radioelectronics and Information Technologies of the Ural Federal University named after the first President of Russia BN. Yeltsin, Yekaterinburg. Sphere of scientific interests: system of radio sounding of the atmosphere, short-range radiolocation system and communication transceiver device of the microwave range; e-mail: s.kudinov@urfu.ru

Viacheslav E. Ivanov is a Doctor of Technical Sciences, professor of the Institute of Radioelectronics and Information Technologies of the Ural Federal University named after the first President of Russia BN. Yeltsin, Yekaterinburg. His scientific interests are upper-air sounding systems, near-field radiolocation and communication systems, microwave transceivers; e-mail: v.e.ivanovekt@gmail.com

Поступила / Received: 30.06.2019

Принята в печать / Accepted: 10.07.2019